

Ingenieurtechnischer Nachweis Rechnerischer Nachweis der Feuerwiderstandsdauer

Sanierung und Erweiterung Johann-Peter-Hebel-Schule
Sammelweisstraße 70
78532 Tuttlingen
Landkreis Tuttlingen

Ingenieurmäßiger Nachweis Rechnerischer Nachweis der Feuerwiderstandsdauer

Erstellt von:



2026-05-18/PAF

Az.: 2026-0173 SIM-B

Sinfiro GmbH & Co. KG

Standort Balingen

Ebertstraße 2
72336 Balingen

Standort München

Herzogspitalstraße 24
80331 München

Telefon: +49 7433 9998-0

www.sinfiro.de | info@sinfiro.de

Dieser Ingenieurtechnische Nachweis umfasst 22 Seiten.

Bauherr

Landratsamt Tuttlingen
Bahnhofstraße 100
78532 Tuttlingen

Architekt/Entwurfsverfasser

Herrmann+Bosch Architekten
Vogelrainstraße 25
70199 Stuttgart

Maßnahmen

- Untersuchung des zeitabhängigen Durchwärmungsverhaltens (thermische Analyse) der Stahlträger im Auladach
- Tragfähigkeitsnachweis unter Brandbeanspruchung
- Rechnerischer Nachweis der Feuerwiderstandsdauer (Normbrand- und Naturbrandbeanspruchung)
- Dokumentation der Simulationsergebnisse

INHALTSVERZEICHNIS

1	AUFGABENSTELLUNG UND VORGEHENSWEISE	4
2	BESCHREIBUNG DER BESTEHENDEN DACHKONSTRUKTION.....	5
3	VORGEHENSWEISE ZUM NACHWEIS DER TRAGFÄHIGKEIT	6
3.1	THERMISCHE EINWIRKUNG	6
3.1.1	EINHEITS-TEMPERATURZEITKURVE (ETK).....	6
4	BRANDSZENARIEN UND BEMESSUNGSBRAND (NATURBRAND).....	8
4.1	BEMESSUNGSBRAND 1	8
5	BERECHNUNG DER RESULTIERENDEN TEMPERATUR IM BRANDRAUM	11
5.1	COMPUTERGESTÜTZTE BRANDSIMULATION	11
5.2	VERWENDETE MESSSTELLEN	11
5.3	ERGEBNISSE DER BRANDSIMULATION	12
6	UNTERSUCHUNG DER STAHLTRÄGER IM DACHBEREICH	13
6.1	NACHWEIS AUF TEMPERATUREBENE MITTELS TEMPERATURKRITERIUM	13
6.2	THERMISCHE ANALYSE DES BAUTEILS UNTER BRANDBEANSPRUCHUNG	14
6.3	MODELLIERUNG DES BAUTEILS	16
6.4	VERWENDETE MATERIALKENNWERTE UND RANDBEDINGUNGEN.....	16
6.5	ERGEBNISSE DER THERMISCHEN ANALYSE	17
7	ZUSAMMENFASSUNG UND ABSCHLIEßENDE BEURTEILUNG	20
8	SCHLUSSBEMERKUNG.....	22
8.1	URHEBERRECHT	22
8.2	AUSFERTIGUNGEN	22

1 Aufgabenstellung und Vorgehensweise

Derzeit plant die Bauherrschaft die Sanierung und Erweiterung der bestehenden Johann-Peter-Hebel-Schule durch Aufstockung um ein weiteres Geschoss und Neuorganisation der Grundrisse.

Das vorhandene Auladach soll in seiner Struktur erhalten bleiben. Bei dem Auladach handelt es sich um eine sternförmige Konstruktion aus stählernen Doppel-T-Trägern (ungeschützt) mit eingeschobenen gelochten hölzernen Kastenprofilen (Lignaturelementen).

In dem aktuellen dazugehörigen Objektbezogenen Brandschutzgutachten (mit dem Datum vom 02.12.2025) wird für die Tragkonstruktion (Dachtragwerk Auladach) mindestens feuerhemmend (R 30) gefordert.

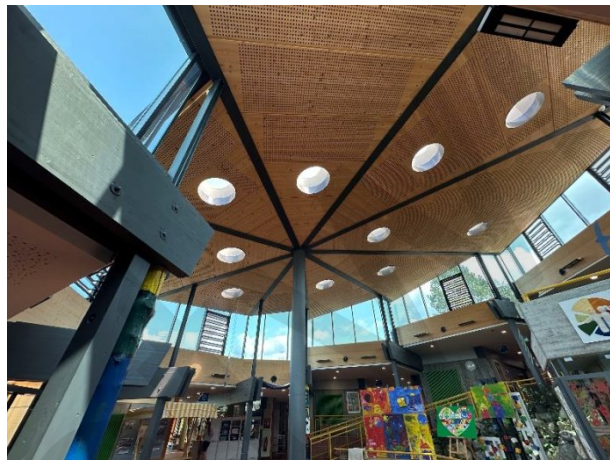


Abbildung 1 | Exemplarische Ansicht der Dachkonstruktion (Auladach)

Eine Einstufung der bestehenden Stahlträger (ungeschützt) in R 30 ist nach Tabellenwerte der aktuellen DIN 4104-4 bzw. DIN EN 1993-1-2 nicht ohne weiteren Nachweis möglich.

Im Rahmen einer thermischen Analyse werden der im Falle eines Brandereignisses resultierende Temperaturverlauf im Bauteil zur Einstufung der Stahlträger berechnet und der rechnerische Feuerwiderstand gemäß DIN EN 1993-1-2 ermittelt.

Ziel ist hierbei zu untersuchen, ob bzw. nachzuweisen, dass der rechnerische Feuerwiderstand der betrachteten Stahlträger > 30 min beträgt.

Zum Nachweis der Tragfähigkeit unter Brandbeanspruchung wird nachfolgende Vorgehensweise angewandt:

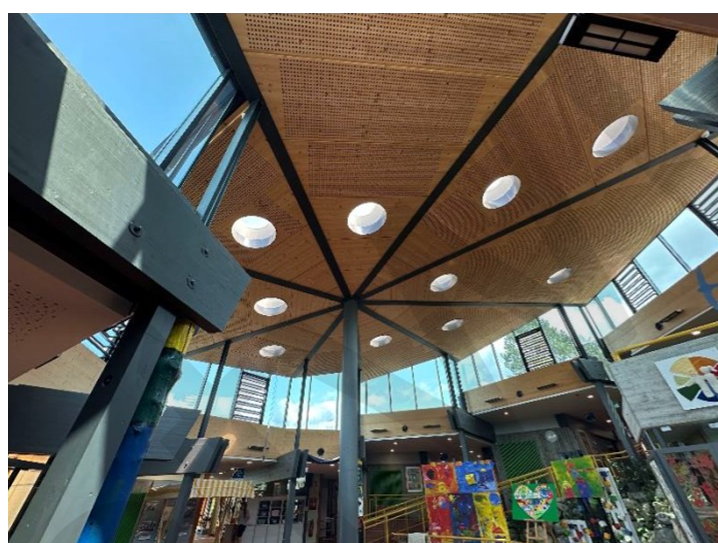
- Durchführung einer thermischen Analyse der Stahlträger unter Brandeinwirkung (Normbrand- und Naturbrandbeanspruchung)
- Ermittlung des rechnerischen Feuerwiderstands.

In dem vorliegenden Dokument werden die Ergebnisse der durchgeführten Simulationen und Berechnungen (Ingenieurmethoden) aufgeführt. Die durchgeführten und in diesem Dokument beschriebenen ingenieurtechnischen Nachweise wurden entsprechend der DIN EN 1991-1-2:2010-12 und DIN EN 1993-1-2:2010-12 durchgeführt. Darüber hinaus orientiert sich der Nachweis an dem vfdb-Leitfaden „Ingenieurmethoden des Brandschutzes“ (TB 04 01).

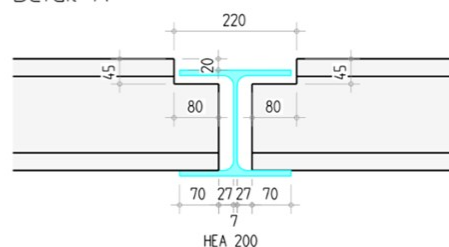
2 Beschreibung der bestehenden Dachkonstruktion

Bei dem Auladach handelt es sich um eine sternförmige Konstruktion aus stählernen Doppel-T-Trägern (ungeschützt) mit eingeschobenen gelochten hölzernen Kastenprofilen LFE200 (Lignatur). Über der akustisch wirksamen Lochung ist ein Absorber (Holzfaserplatten) eingelegt. Die Holzelemente lagern auf den unteren Flanschen der Stahlträger. Die Stahlträger liegen auf einer zentralen Stahlstütze aus einem kreisförmigen Hohlprofil (368 x 10) auf. Jeder Stahlträger ist zusätzlich jeweils durch eine Stahl-Pendelstütze an der Fassadenseite unterstützt.

Nachfolgend sind die für den vorliegenden Tragfähigkeitsnachweis unter Brandbeanspruchung wichtigsten Daten der Dachkonstruktion zusammengefasst dargestellt.



Detail A



Auszug aus Planung Lignatur

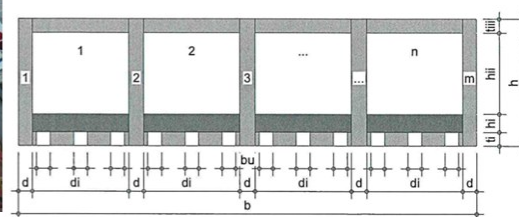


Abbildung 2 | Ansicht Auladach und Detailzeichnungen [Quelle: GA008-01: Einschätzung Feuerwiderstand zentrales Auladach, tragwerkeplus GmbH & Co. KG]

In dem vorliegenden Dokument GA008-01: Einschätzung Feuerwiderstand zentrales Auladach (erstellt durch die tragwerkeplus GmbH & Co. KG) werden erwartungsgemäß die ungeschützten Stahlträger als Schwachstelle bzgl. Feuerwiderstand identifiziert.

Für die Holzelemente wird in dem Bericht ein Feuerwiderstand im Bereich von 30 Minuten angegeben: „Auch wenn aufgrund der Lochungen nicht abschließend nachgewiesen werden kann, dass der rechnerische Durchbrand erst nach 30 Minuten passiert, so ist doch eine Brandschutzqualität zu erwarten, die in die Nähe dieser Grenze kommen kann.“

3 Vorgehensweise zum Nachweis der Tragfähigkeit

Die Reihe der Eurocodes sind grundlegende europäische Normen, welche europaweit vereinheitlichte Regeln für die Bemessung im Bauwesen und in der Tragwerksplanung definieren. Gemäß den Eurocodes stehen prinzipiell drei verschiedene Nachweisebenen für die Bemessung der Standsicherheit von Bauteilen und Tragwerken im Brandfall zur Verfügung:

- Ebene 1: Tabellarische Bemessungsverfahren
- Ebene 2: Vereinfachte Bemessungsverfahren
- Ebene 3: Erweiterte Bemessungsverfahren.

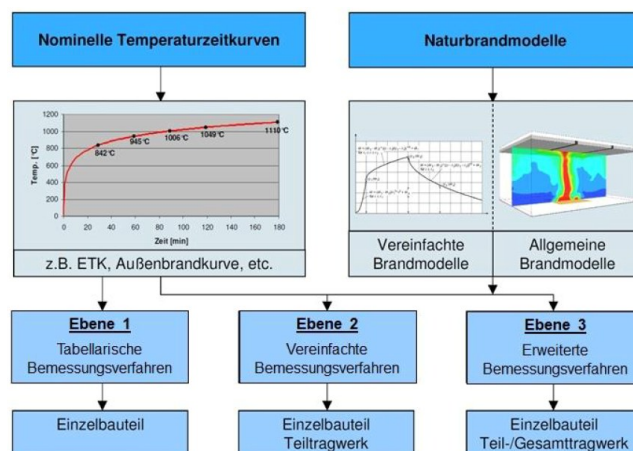


Abbildung 3 | Nachweisebenen gemäß Eurocode [Quelle: vfdb-Leitfaden TB 04-01]

3.1 Thermische Einwirkung

Im Hinblick auf die Brandbeanspruchung ist für Bauteile im Hochbau gemäß DIN EN 1991-1-2 in der Regel die Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) anzuwenden.

Alternativ können im Zusammenhang mit einem Brandschutzkonzept Naturbrandmodelle zur Abbildung der (realistischeren) Brandbeanspruchung herangezogen werden.

3.1.1 Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK)

Die Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) gemäß DIN 4102-2 (bzw. DIN EN 1991-1-2 oder ISO 834) wird unmittelbar als Brandraumtemperatur bzw. für die resultierende Heißgastemperatur verwendet. Die ETK beschreibt den zeitlichen Verlauf der resultierenden Temperaturen in der Phase eines Vollbrandes und vernachlässigt die Entstehungs- und Abklingphase des Brandes.

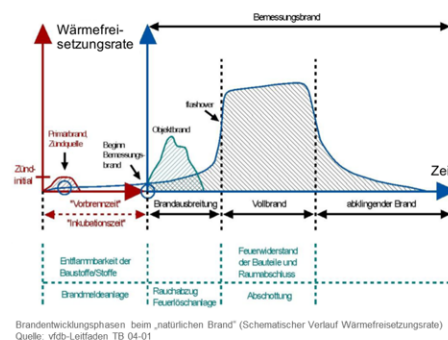
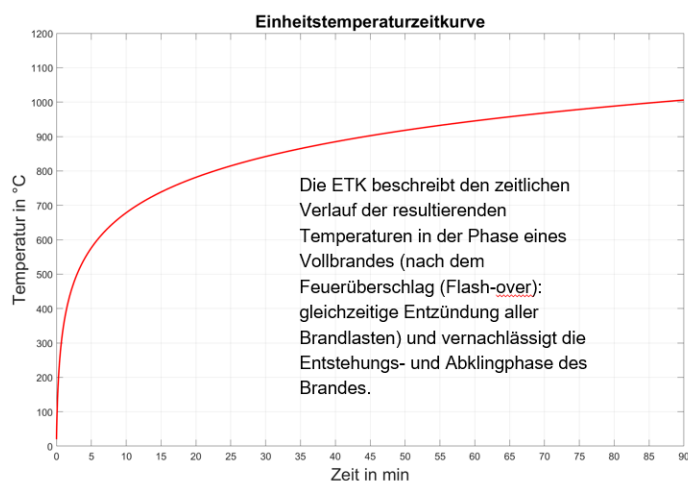


Abbildung 4 | Verlauf der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK)

In den meisten Fällen wird die Annahme der ETK zu auf der sicheren Seite liegenden Ergebnissen führen, da die ETK ständig ansteigende Temperaturen auf hohem Niveau vorsieht. Ist die Tragsicherheit unter ETK-Brandbeanspruchung nachgewiesen, gilt dieser Nachweis unabhängig von der späteren Nutzung.

4 Brandszenarien und Bemessungsbrand (Naturbrand)

Das Gebäude wird als Schule (Nutzung als Sonderschule für Menschen mit Behinderung) genutzt. Die zentrale Eingangshalle wird im Erdgeschoss (Aula) auch als Versammlungsstätte (für typische Schulnutzung) genutzt.

Zur Nachweisführung wurde auf Grundlage der geplanten Nutzung ein hochenergetisches Bemessungsbrandszenarium im EG der Aula (Eingangshalle) definiert, welches die spezifische Nutzung im Hinblick auf die Variationsvielfalt möglicher Ereignisse hinreichend genau abbildet.

4.1 Bemessungsbrand 1

Der Bemessungsbrand 1 bildet einen hochenergetischen Brand im EG der Aula ab. Als Brandgut wird eine Mischbrandlast aus Holz, diversen Kunststoffen und Papier angesetzt. Der zeitliche Verlauf der Wärmefreisetzungsrate wird nach dem international anerkannten αt^2 -Ansatz bestimmt.

Es gilt:

$$\dot{Q}(t) = \alpha \cdot t^2$$

mit

$\dot{Q}(t)$ = Wärmefreisetzungsrate in kW

α = Brandentwicklungsfaktor in kW/s²

t = Zeit ab Brandausbruch in s

Unter Berücksichtigung der geplanten Nutzung wird der Brandentwicklungsfaktor $\alpha = 0,04444$ kW/s² verwendet. Dies entspricht einer schnellen Brandausbreitungsgeschwindigkeit.

Bei dem Bemessungsbrandszenarium wird eine steigende Brandintensität bis zum Erreichen der maximalen Brandfläche von 32 m² zugrunde gelegt.

Nach dem Erreichen der maximalen Wärmefreisetzungsrate (nach ca. 410 s) verläuft diese konstant weiter. Der Zeitpunkt 1.800 s stellt das Ende des Betrachtungszeitraumes und das Verlassen des Geltungsbereiches des vorliegenden Nachweises dar.

Die maximale Wärmefreisetzungsrate wird demnach unter Berücksichtigung einer flächenspezifischen Wärmefreisetzungsrate von 250 kW/m² auf 8,0 MW begrenzt.

In nachfolgender Tabelle sind die relevanten Parameter und Randbedingungen für den untersuchten Bemessungsbrand 1 zusammenfassend dargestellt.

Bemessungsbrandszenarium 1 Bemessungsbrand 1		
Ort der Brandquelle	Erdgeschoss Aula	
Brandgut/Brandlast	Mischbrandlast	
Parameter	Wert	Einheit
wirksame Brandfläche	32	m ²
max. flächenspezifische Wärmefreisetzung RHR_f	250	kW/m ²
charakteristische Brandwachstumszeit t_α (characteristic fire growth time)	150 (schnell)	s
Brandentwicklungsfaktor α	0,04444	kW/s ²
maximale Wärmefreisetzungsrate	8.000	kW

In nachfolgender Abbildung sind der resultierende Brandverlauf bzw. der zeitliche Verlauf der Wärmefreisetzungsrate dargestellt.

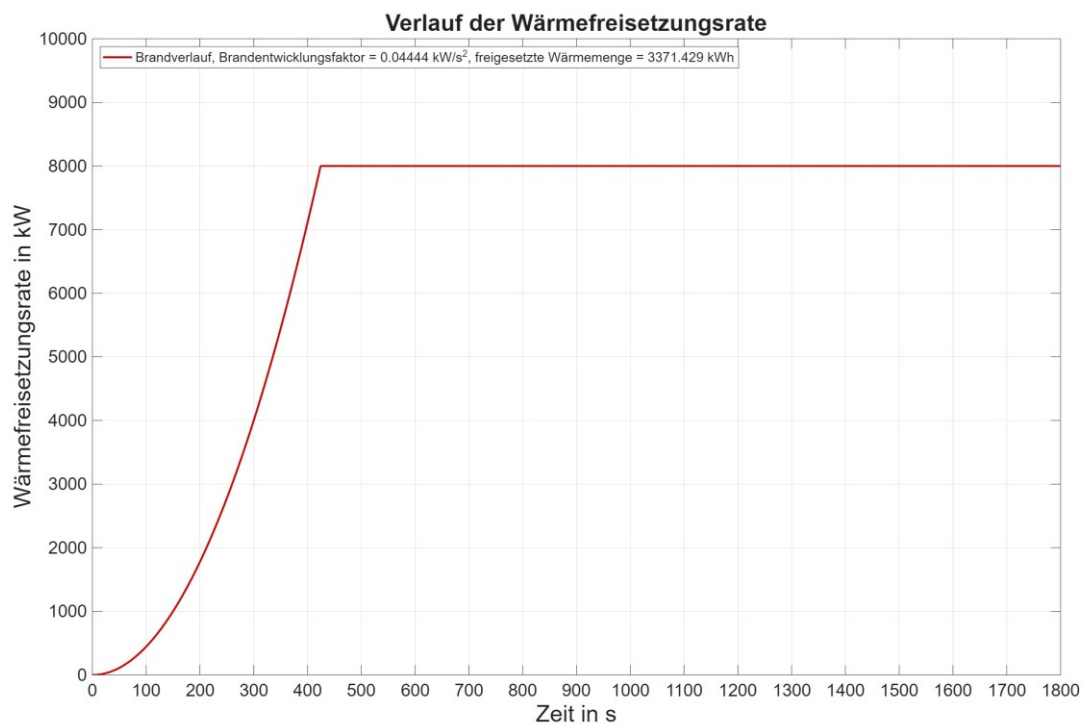


Abbildung 5 | Brandverlaufskurve bzw. zeitlicher Verlauf der Wärmefreisetzungsrate Bemessungsbrand 1

Eine maximale Wärmefreisetzungsrate von 8,0 MW entspricht beispielsweise der maximalen Wärmefreisetzungsrate von

- 27 Europaletten

bzw.

- 1,5 Mittelklasse PKW (inkl. vollem Tank)

im Vollbrand.

5 Berechnung der resultierenden Temperatur im Brandraum

Für die Berechnung der resultierenden Temperaturen existieren verschiedene Verfahren. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung werden die resultierenden Temperaturen mit den folgenden Verfahren ermittelt.

5.1 Computergestützte Brandsimulation

Um zu untersuchen, welche Temperaturbeanspruchung an dem Auladach im Falle eines Brandes im Gebäude resultiert, werden Brandsimulationen durchgeführt.

Die computergestützten Brandsimulationen werden mit Hilfe des Simulationsprogramms FDS (Fire Dynamics Simulator, Version 6.9.1) des National Institute of Standards and Technology (NIST) durchgeführt.

Bei dem Programm handelt es sich um ein international anerkanntes und bei Ingenieurbüros und Forschungsinstitutionen weit angewendetes CFD-Simulationsprogramm für Brandsimulationen.

Basierend auf den Planunterlagen, welche Sinfire zur Verfügung gestellt und für die Simulation freigegeben wurden, wurde der für den Nachweis relevante Bereich des Gebäudes in das Simulationsprogramm „Fire Dynamics Simulator“ (Version 6.9.1) implementiert.

Die Berechnung mit FDS erfordert eine Diskretisierung der Geometrie in ein dreidimensionales, rechtwinkliges Berechnungsgitter. Das Berechnungsgitter umfasst im Falle des zu untersuchenden Objektes die gesamte zuvor beschriebene Gebäudegeometrie sowie jeweils zuzüglich 5 m Luftraum seitlich und 5 m oberhalb des Gebäudes.

Die tatsächliche Gebäudegeometrie wird durch die Diskretisierung in einzelne rechtwinklige Gitterzellen aufgeteilt, wonach sich – entsprechend der gewählten Zellgröße – eine Abweichung zwischen der tatsächlichen Geometrie und dem Simulationsmodell ergibt.

Zur Untersuchung des Objektes wurde eine Gittergröße von 10 cm x 10 cm x 10 cm verwendet.

Generell sind für jede Simulation Randbedingungen bzw. Annahmen zu treffen, welche die Realität ausreichend genau beschreiben. Dies gilt sowohl für gebäudespezifische Eigenschaften wie auch für Umgebungseinflüsse.

Bei den durchgeführten Brandsimulationen wurden nachfolgende Randbedingungen und Annahmen getroffen:

- Normalbedingungen für den Umgebungsdruck (1.013,25 mbar) bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C
- Rauchableitungsöffnungen gemäß Forderung Brandschutzgutachten
- Zuluft ist sichergestellt (brandlastgesteuert).

5.2 Verwendete Messstellen

Zur Ermittlung der zeitabhängigen Werte der Beurteilungsgrößen (adiabate Oberflächentemperatur) werden 2.230 Messfühler im Simulationsmodell an dem Auladach angeordnet. Die verwendeten Messfühler erfassen die resultierende adiabate Oberflächentemperatur am Dach direkt oberhalb der Brandfläche.

Die adiabate Oberflächentemperatur (AST) entspricht einer idealen Oberflächentemperatur, die unter der Annahme ermittelt wird, dass der Wärmetransfer in eine Oberfläche der Wärmeabgabe von dieser gleich ist.

Sie beinhaltet somit sowohl die konvektiven als auch die radiativen Anteile der auf die Bauteile einwirkenden Nettowärmeströme. Unter realen Bedingungen sind die resultierenden Temperaturen niedriger als die adiabate Oberflächentemperatur. Die AST kann als eine effektive Temperatur interpretiert werden, mit welcher ein Objekt beaufschlagt wird und entspricht bei einem Brandversuch der Temperatur im Brandraum.

5.3 Ergebnisse der Brandsimulation

Nachfolgende Abbildung zeigt den zeitlichen Verlauf der resultierenden adiabaten Oberflächentemperaturen am Auladach für alle 2.230 Messstellen.

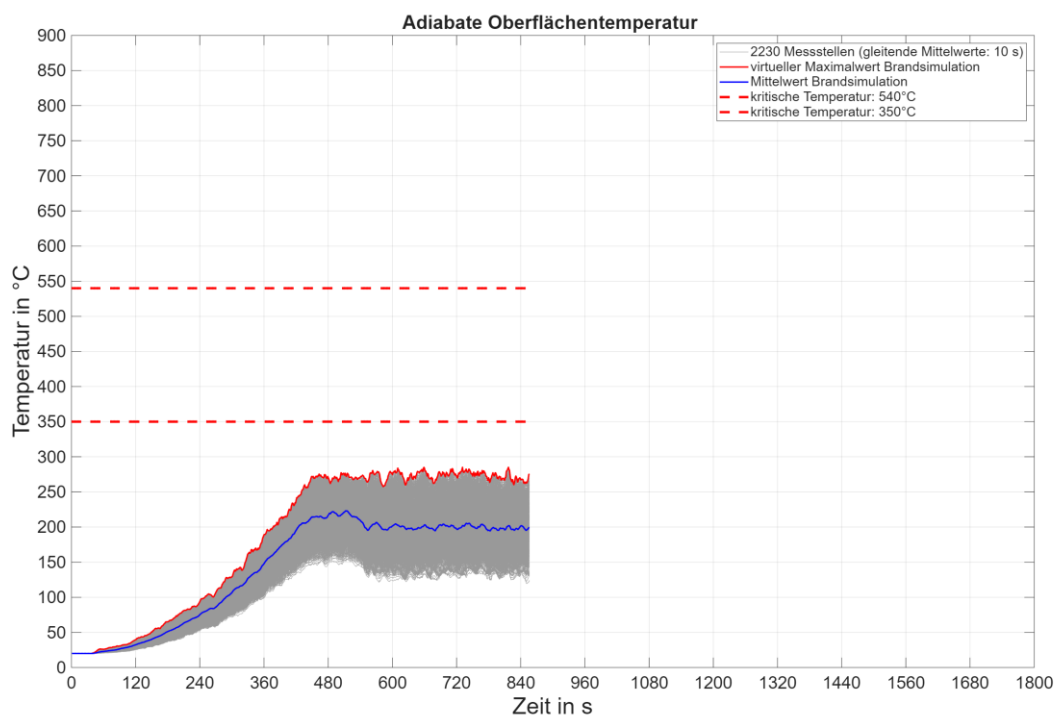


Abbildung 6 | Resultierende Temperaturzeitkurve am Auladach (Ausschnitt)

Die Ergebnisse zeigen, dass sich kurz nach Erreichen der maximalen Wärmefreisetzungsrates quasi stationäre Zustände einstellen. Die virtuelle maximale adiabate Oberflächentemperatur entspricht zu jedem Zeitschritt der maximalen Temperatur aller 2.230 Messstellen und liegt im Bereich von maximal 290 °C. Die virtuelle maximale adiabate Oberflächentemperatur dient als Ausgangsbasis für die Berechnung der resultierenden Bauteiltemperatur.

6 Untersuchung der Stahlträger im Dachbereich

Nachfolgend werden die durchgeführten Untersuchungen der Stahlträger im Dachbereich unter Brandbeanspruchung (Normbrand- und Naturbrandbeanspruchung) beschrieben.

6.1 Nachweis auf Temperaturebene mittels Temperaturkriterium

Gemäß DIN EN 1993-1-2 kann für Stahlbauteile der Nachweis auf Temperaturebene (mittels Temperaturkriterium) geführt werden. Beim Nachweis auf Temperaturebene wird nachgewiesen, dass die maximale Temperatur im Bauteil den kritischen Wert nicht überschreitet, bei dem das Bauteil versagen würde. Demnach darf die Temperatur im Bauteil im Fall einer ETK-Beanspruchung während der angestrebten Feuerwiderstandsdauer zu keinem Zeitpunkt über der kritischen Temperatur liegen.

Die kritische Temperatur ist die Temperatur, bei der der Bauteilwiderstand noch so groß ist wie die Beanspruchung infolge mechanischer Lasten.

Für Bauteile (Querschnittsklassen 1, 2 und 3), bei denen Einflüsse der Verformungen auf die Schnittgrößen (Th. II. O., Stabilität) nicht beachtet werden müssen, gilt gemäß Eurocode (DIN EN 1993-1-2) zur Berechnung der kritischen Temperatur in Abhängigkeit des Ausnutzungsgrades:

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \cdot \ln \left[\frac{1}{0,9674 \cdot \mu_0^{3,833}} \right] + 482$$

mit

$\theta_{a,cr}$: kritische Stahltemperatur in °C

μ_0 : Ausnutzungsgrad

Nach dieser Formel ergibt sich für die kritische Stahltemperatur in Abhängigkeit des Ausnutzungsgrades das nachfolgende Diagramm.

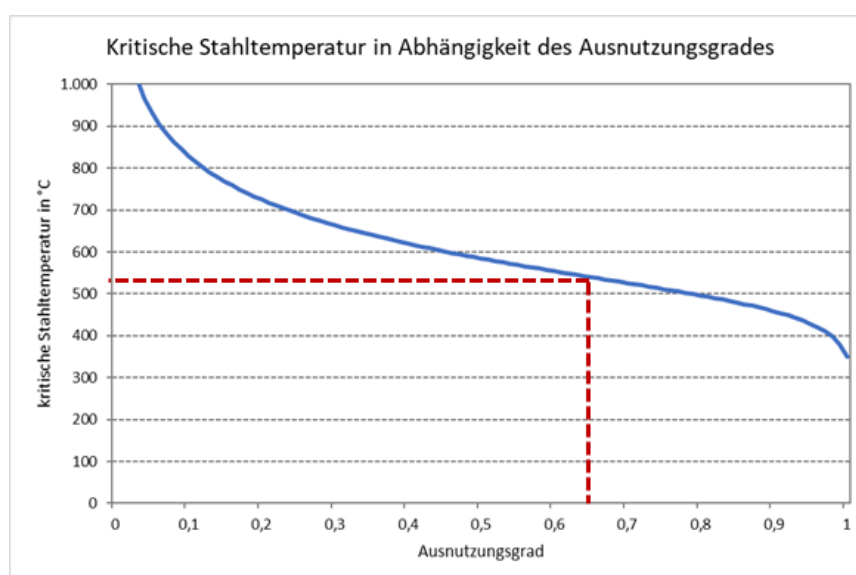


Abbildung 7 | Kritische Stahltemperatur in Abhängigkeit des Ausnutzungsgrades

Nach derzeitigem Stand der Normung darf für Bauteile auch vereinfacht der Ausnutzungsgrad μ_0 mit 0,65 angenommen werden. Damit ergibt sich im ungünstigsten Fall (bei Volllastung unter Normaltemperatur) die kritische Stahltemperatur zu $\theta_{cr} = 540 \text{ °C}$.

Für die untersuchten Stahlträger wird in der vorliegenden Untersuchung eine kritische Stahltemperatur $\theta_{cr} = 350 \text{ °C}$ angesetzt. Der gewählte Wert stellt gegenüber rechnerisch möglichen höheren kritischen Temperaturen einen konservativen Ansatz dar und berücksichtigt zudem Unsicherheiten hinsichtlich der im Brandfall wirksamen seitlichen Halterung der Stahlträger.

Für die untersuchte Stahlsteindecke ist (aufgrund der Forderung feuerhemmende Qualität) nachzuweisen, dass für den Zeitraum von 30 min die kritische Temperatur $\theta_{cr} = 350 \text{ °C}$ im Stahlträgerquerschnitt bei Normbrandbeanspruchung nicht überschritten bzw. bei Naturbrandbeanspruchung nicht erreicht wird.

6.2 Thermische Analyse des Bauteils unter Brandbeanspruchung

Bei einer thermischen Analyse wird die resultierende zeitabhängige Temperaturverteilung (zeitliche und lokale Temperaturverteilung, transiente Temperaturfelder) im Bauteil unter thermischer Beanspruchung (z. B. Brandbeanspruchung) berechnet. Dadurch ist es möglich die Temperatur zu jedem Zeitpunkt an jeder Stelle im Bauteilquerschnitt zu berechnen.

Bei diesem Verfahren wird der Wärmestrom (Wärmeübergang) in das Bauteil und die Temperatursausbreitung bzw. die resultierende zeitliche Temperaturverteilung im Bauteil berechnet. Dabei sind folgende Wärmetransportmechanismen relevant:

- Konvektion
- Wärmestrahlung
- Wärmeleitung

Der Wärmestrom in das Bauteil (d. h. der Wärmeübergang an den Außenrändern brandbeanspruchter Querschnitte) setzt sich zusammen aus Konvektion und Strahlung. Der flächenspezifische Wärmestrom $\dot{q}_i$ auf den brandbeanspruchten Flächen des Bauteiles berechnet sich wie folgt:

$$\dot{q}_i = \alpha_i \cdot (T_g - T_{w,i}) + \varepsilon_{f,g} \cdot \varepsilon_b \cdot \sigma \cdot (T_g^4 - T_{w,i}^4)$$

mit

- α_i : Wärmeübergangskoeffizient in $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- T_g : absolute Rauchgastemperatur (zeitabhängig) in K (hier ETK bzw. SBK)
- $T_{w,i}$: absolute Oberflächentemperatur (zeitabhängig) des Bauteils in K
- σ : Stefan-Boltzmann-Konstante in $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
- $\varepsilon_{f,g}$: Emissivität des Feuers
- ε_b : Emissivität der Bauteiloberfläche

Nachfolgende Abbildung verdeutlicht exemplarisch die Wärmeströme in ein brandbeanspruchtes Bauteil.

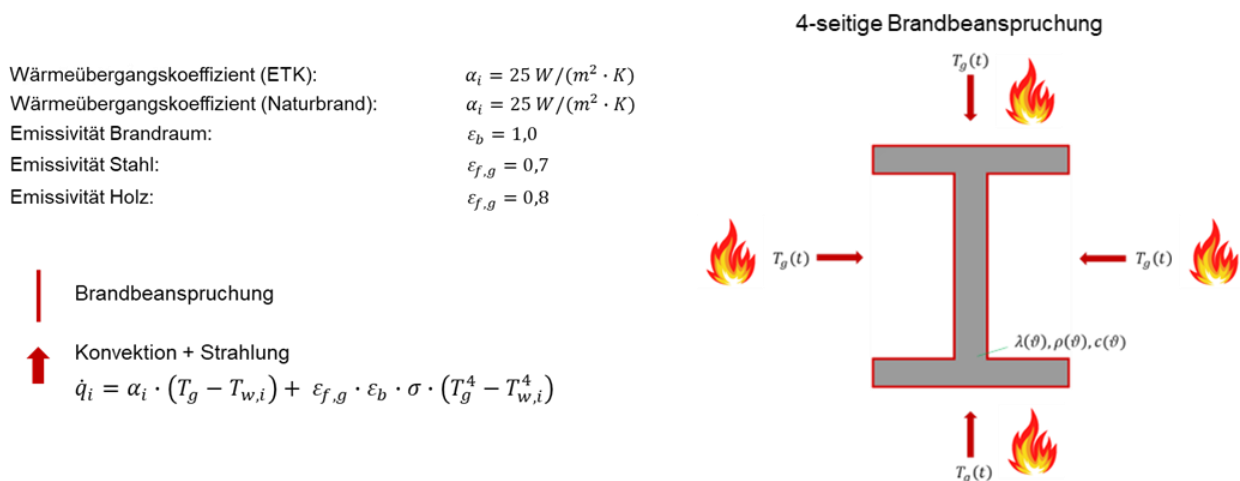


Abbildung 8 | Exemplarische Darstellung der Wärmeströme ins brandbeanspruchte Bauteil

Die instationäre Wärmeleitung in Festkörpern und somit die zeitabhängige Temperaturverteilung im Bauteil berechnet sich gemäß der FOURIERSchen-Differentialgleichung (exemplarisch für die zweidimensionale instationäre Wärmeleitung):

$$\frac{\partial T_b}{\partial t} = \frac{\lambda_b}{\rho_b \cdot c_b} \cdot \left(\frac{\partial^2 T_b}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_b}{\partial y^2} \right)$$

mit:

- T_b : Temperatur als Funktion der Zeit t und des Ortes (x-Koordinate, y-Koordinate)
- t : Zeit in s
- x : Ortskoordinate, x-Koordinate in m
- y : Ortskoordinate, y-Koordinate in m
- λ_b : Wärmeleitfähigkeit (temperaturabhängig) in $\text{W/(m} \cdot \text{K)}$
- ρ_b : Dichte (temperaturabhängig) in kg/m^3
- c_b : spezifische Wärmekapazität (temperaturabhängig) in $\text{J/(kg} \cdot \text{K)}$

Zur Lösung des instationären Wärmeleitproblems können verschiedene numerische Methoden wie beispielsweise die Finite-Elemente-Methode (FEM) oder die Methode Finiten-Differenzen-Methode mit Integrationsverfahren über die Zeitschritte angewandt werden.

Auf Basis der berechneten zeitabhängigen Temperaturverteilung im Bauteilquerschnitt lassen sich durch einen Vergleich mit der kritischen Temperatur (Temperaturkriterium) Aussagen treffen, ob die resultierenden Temperaturen für das zu untersuchende Bauteil in einem kritischen Bereich liegen bzw. die rechnerische Feuerwiderstandsdauer ermitteln.

6.3 Modellierung des Bauteils

Unter Verwendung der Software MATLAB¹ (Version 2025b) wird der durch die Brandbeanspruchung verursachte Wärmeübergang in das Bauteil und die Temperaturentstehung (zweidimensional) bzw. die resultierende zeitliche Temperaturverteilung im Bauteilquerschnitt berechnet.

Das zu untersuchende Bauteil wird in MATLAB abgebildet. Nachfolgende Abbildungen zeigen das erstellte Modell des Bauteils (im Ist-Zustand und mit einer Holzbekleidung des unteren Flanschs des Stahlträgers) inklusive Berechnungsgitter (Finite-Elemente-Netz).

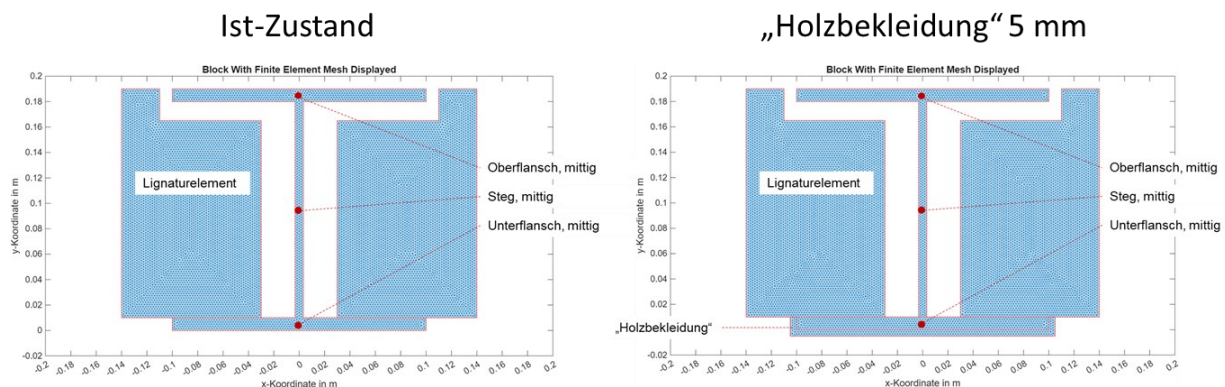


Abbildung 9 | In MATLAB modellierte Dachkonstruktion (im Ist-Zustand und mit einer Holzbekleidung des unteren Flanschs des Stahlträgers) und Finite-Elemente-Netz

Die Elementgröße der Finite-Elemente-Netze ist so gewählt, dass eine weitere Verfeinerung zu keiner Verbesserung der Ergebnislösung führt.

6.4 Verwendete Materialkennwerte und Randbedingungen

Für die Berechnung der Temperaturverteilung wird für die brandbeanspruchten Seiten des Bauteils für die ETK-Brandbeanspruchung ein Wärmeübergangskoeffizient von $\alpha = 25 \text{ W}/(\text{K} \cdot \text{m}^2)$ bzw. für die Naturbrandbeanspruchung $\alpha = 35 \text{ W}/(\text{K} \cdot \text{m}^2)$ gemäß DIN EN 1991-1-2:2010 angesetzt. Die Emissivität der Bauteiloberfläche (Stahl: $\varepsilon_b = 0,7$; Holz: $\varepsilon_b = 0,8$) und des Feuers ($\varepsilon_{f,g} = 1,0$) wird gemäß DIN EN 1991-1-2:2010 angesetzt (vgl. Abbildung 8).

Für die brandabgewandte Seite ist gemäß DIN EN 1991-1-2:2010 ein Wärmeübergangskoeffizient von $\alpha = 4 \text{ W}/(\text{K} \cdot \text{m}^2)$ zu verwenden

Die Ausgangstemperatur des Bauteils und die Umgebungstemperatur an der brandabgewandten Seite wird zu $\vartheta_{\text{amb}} = 20 \text{ °C}$ angenommen.

In nachfolgenden Tabellen sind die verwendeten Materialkennwerte für Stahl und Holz zusammengefasst dargestellt:

¹ Das Programm wurde anhand der im Nationalen Anwendungsdokument zu DIN EN 1991-1-2, Anhang CC benannten Beispielen validiert. Das Programm arbeitet im Rahmen der DIN EN 1991-1-2/NA hinreichend genau und ist somit für die thermische Analyse von brandbeanspruchten Bauteilen vollumfänglich geeignet.

Material	Parameter	Wert	Einheit	Bemerkung
Holz	Rohdichte	430	kg/m ³	Fichte, lufttrocken (12-15 % Feuchte)
	Dichte	temperaturabhängig	kg/m ³	gemäß DIN EN 1995-1-2
	spez. Wärmekapazität	temperaturabhängig	kJ/(kg*K)	gemäß DIN EN 1995-1-2
	Wärmeleitfähigkeit	temperaturabhängig	W/(m*K)	gemäß DIN EN 1995-1-2
Stahl	Rohdichte	7.850	kg/m ³	gemäß DIN EN 1993-1-2
	spez. Wärmekapazität	temperaturabhängig	kJ/(kg*K)	gemäß DIN EN 1993-1-2
	Wärmeleitfähigkeit	temperaturabhängig	W/(m*K)	gemäß DIN EN 1993-1-2

Folgende Vereinfachungen wurden für die thermische Analyse gemäß vfdb-Leitfaden (TB 04-02) getroffen:

- Die Temperatursausbreitung in Bauteillängsrichtung wird vernachlässigt.
- Die Temperatursausbreitung wird nur in der Querschnittsfläche (zweidimensional) berechnet.

6.5 Ergebnisse der thermischen Analyse

In den nachfolgenden Abbildungen sind links die resultierende Temperaturverteilung im Bauteilquerschnitt und rechts die Temperaturentwicklung in ausgesuchten Querschnittspunkten unter ETK-Brandbeanspruchung dargestellt. Folgende Varianten wurden untersucht:

- Dachkonstruktion (Ist-Zustand) unter Normbrandbeanspruchung (ETK)
- Dachkonstruktion (Holzbekleidung 5 mm an unterem Flansch) unter Normbrandbeanspruchung (ETK)
- Dachkonstruktion (Ist-Zustand) unter Naturbrandbeanspruchung.

Für die untersuchten Stahlträger ist (aufgrund der Forderung feuerhemmend bzw. R 30) nachzuweisen, dass für einen Zeitraum von 30 min die kritische Temperatur $\theta_{cr} = 350 \text{ °C}$ im Bereich der Stahlträger nicht überschritten wird.

Nachfolgende Abbildung zeigt, dass im Ist-Zustand der Dachkonstruktion bei einer Normbrandbeanspruchung die kritische Temperatur im Untergurt des Stahlträgers nach ca. 12 min erreicht wird.

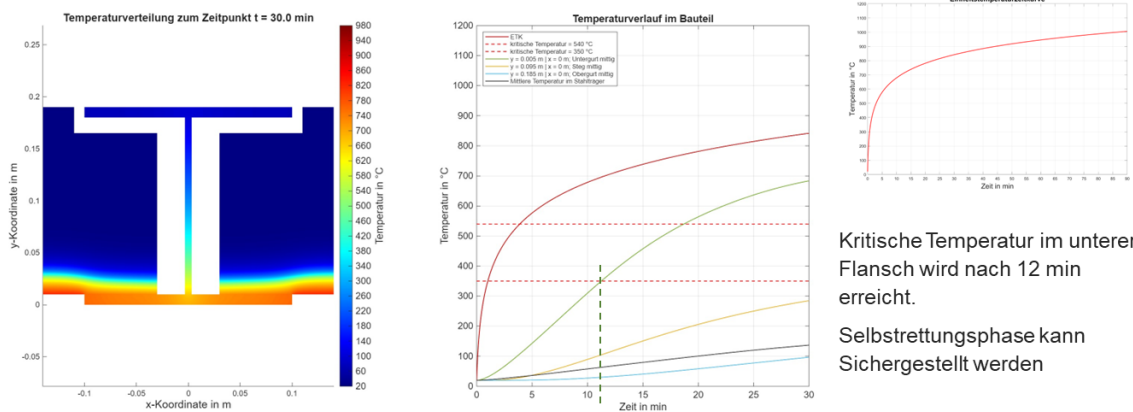


Abbildung 10 | Berechnete Temperaturverteilung im Bauteil und Temperaturverlauf unter ETK-Brandbeanspruchung

Bei einer 5 mm Holzbekleidung des unteren Flansches des Stahlträgers wird bei einer Normbrandbeanspruchung die kritische Temperatur im Untergurt des Stahlträgers nach ca. 30 min erreicht.

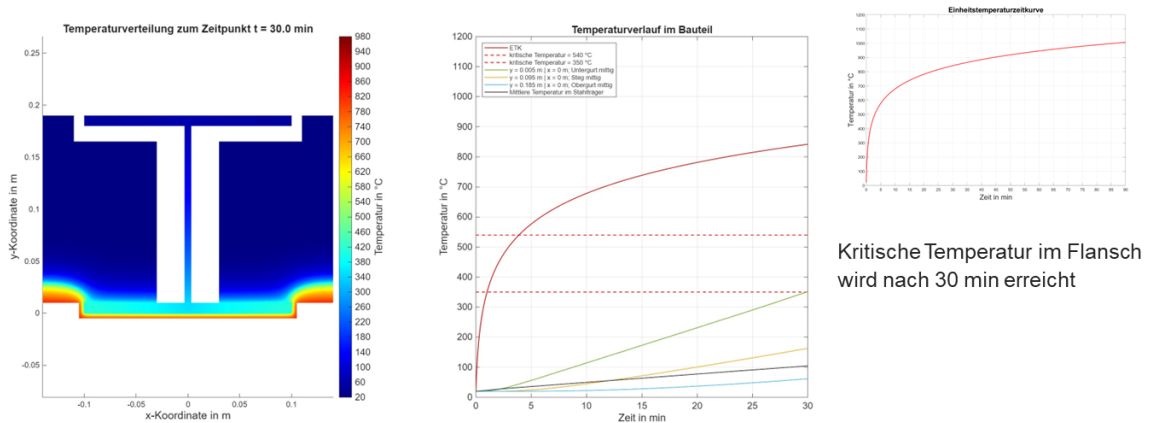
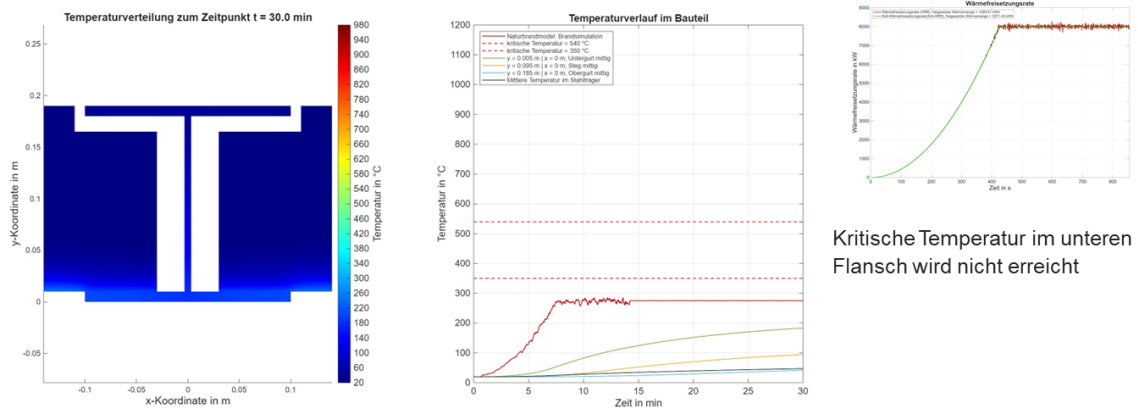


Abbildung 11 | Berechnete Temperaturverteilung im Bauteil und Temperaturverlauf unter ETK-Brandbeanspruchung (inkl. 5 mm Holzbekleidung)

Die Ergebnisse (vgl. nachfolgende Abbildung) unter Naturbrandbeanspruchung zeigen, dass die resultierenden Temperaturen im Bauteilquerschnitt signifikant unterhalb der kritischen Temperatur liegen.



Kritische Temperatur im unteren Flansch wird nicht erreicht

Abbildung 12 | Berechnete Temperaturverteilung im Bauteil und Temperaturverlauf unter Naturbrandbeanspruchung

Der rechnerische Feuerwiderstand der Stahlträger beträgt unter Naturbrandbeanspruchung > 30 min. Auf Grundlage der Ergebnisse der (mit Ingenieurmethoden) durchgeführten Untersuchungen kann für die untersuchten Stahlträger (Dachträger) im Hinblick auf die objektspezifischen Schutzziele auf eine brandschutztechnische Ertüchtigung aus ingenieurmäßiger Sicht verzichtet werden.

Alle Stützen sind entsprechend auf R 30 zu ertüchtigen.

7 Zusammenfassung und abschließende Beurteilung

Bei der geplanten Sanierung der bestehenden Johann-Peter-Hebel-Schule soll das vorhandene Auladach in seiner Struktur erhalten bleiben. Bei dem Auladach handelt es sich um eine sternförmige Konstruktion aus stählernen Doppel-T-Trägern (ungeschützt) mit eingeschobenen gelochten hölzernen Kastenprofilen (Lignaturelementen).

In dem aktuellen dazugehörigen Objektbezogenen Brandschutzgutachten (mit dem Datum vom 02.12.2025) wird für die Tragkonstruktion (Dachtragwerk Auladach) mindestens feuerhemmend (R 30) gefordert.

Die betrachtete Dachkonstruktion kann nach Tabellenwerte der DIN EN 4104-4 bzw. DIN EN 1993-1-2 nicht ohne weiteren Nachweis als feuerhemmend (R 30) eingestuft werden.

Es wurden Ingenieurmethoden zur Ermittlung und Beurteilung der Temperaturbelastung der Stahlträger in der Dachkonstruktion mit dem Ziel der ingenieurmäßigen Abschätzung des Tragvermögens bzw. der Widerstandsfähigkeit im Brandfall und der Bestimmung des rechnerischen Feuerwiderstands angewandt.

- Die Nachweisführung für die Stahlträger im Dachbereich erfolgte auf Temperaturebene gemäß DIN EN 1993-1-2.
- Als Temperaturkriterium wurde die kritische Temperatur $\theta_{cr} = 350 \text{ °C}$ (auf der sicheren Seite liegend) bestimmt.
- Die thermische Analyse der Dachkonstruktion erfolgte unter Normbrand- und Naturbrandbeanspruchung.
- Die thermische Analyse wurde gemäß DIN EN 1991-1-2:2010 durchgeführt.
- Das verwendete Programm wurde anhand der im Nationalen Anwendungsdokument zu DIN EN 1991-1-2, Anhang CC benannten Beispielen validiert. Das Programm arbeitet im Rahmen der DIN EN 1991-1-2/NA hinreichend genau und ist somit für thermische Analysen von brandbeanspruchten Bauteilen vollumfänglich geeignet.

In nachfolgender Tabelle sind die Ergebnisse der untersuchten Varianten zusammenfassend dargestellt:

Variante	Brandereignis	Rechnerischer Feuerwiderstand	Bemerkung
Stahlträger (Dachbereich)	Normbrand (ETK)	12 min < 30 min	▪ kritische Temperatur Stahlträger $\theta_{cr} = 350 \text{ °C}$ ▪ Selbstrettungsphase sichergestellt
Stahlträger (Dachbereich) geschützt durch Holz an Flanschunterseite	Normbrand (ETK)	30 min	▪ kritische Temperatur Stahlträger $\theta_{cr} = 350 \text{ °C}$ ▪ Holzbekleidung an Flanschunterseite mit 5 mm
Stahlträger (Dachbereich)	Naturbrand	> 30 min kein vorzeitiges Versagen der Stahlträger	▪ kritische Temperatur Stahlträger $\theta_{cr} = 350 \text{ °C}$

Auf Grundlage der Ergebnisse der (mit Ingenieurmethoden) durchgeführten Untersuchungen kann für die untersuchten Stahlträger (Dachträger) im Hinblick auf die objektspezifischen Schutzziele auf eine brandschutztechnische Ertüchtigung aus ingenieurmäßiger Sicht verzichtet werden

- Die zentrale Stahlstütze ist entsprechend Anforderung R 30 zu ertüchtigen.
- Alle Stahl-Pendelstützen sind entsprechend Anforderung R 30 zu ertüchtigen.
- Durch eine (optionale) Bekleidung der freiliegenden Stahlträger im Dachbereich mit Holz ($\geq 5\text{mm}$) würde der rechnerische Feuerwiderstand unter Normbrandbeanspruchung signifikant steigen.

Die Äquivalenz zum entsprechenden baurechtlichen Schutzziel wurde damit nachgewiesen.

Es wird darauf hingewiesen, dass bei einer Änderung in der Bauausführung gegenüber der statischen Berechnung dieselbe auf ihre Weiterverwendbarkeit zu überprüfen ist.

